

Summary of the Cabin Structure of Foreign Heavy Launch Vehicle

Jiujiu Lv, Xiuyan Zhang, Ye Yang, Youwei Li, Song Li

Capital Aerospace Machinery Company, Beijing
Email: machinejiu@163.com

Received: Sep. 1st, 2019; accepted: Sep. 18th, 2019; published: Sep. 25th, 2019

Abstract

The research and launching of heavy launch vehicle are the embodiment of a country's comprehensive national strength, and the cabin structure is an important part of the rocket. The structure of heavy launch vehicles that have successfully launched and are being researched is emphatically analyzed. Then the development trend of cabin structure and material are briefly introduced.

Keywords

Heavy Launch Vehicle, Cabin Structure

国外重型运载火箭的舱段结构概述

吕九九, 张秀艳, 杨 烨, 李宥玮, 李 松

首都航天机械有限公司, 北京
Email: machinejiu@163.com

收稿日期: 2019年9月1日; 录用日期: 2019年9月18日; 发布日期: 2019年9月25日

摘 要

重型运载火箭的研制和发射是一个国家综合国力的体现, 舱段结构是火箭的重要组成部分, 本文着重分析已成功发射和正在研制的运载火箭结构, 简要介绍了各国重型运载火箭的发展趋势及舱段结构和材料的发展趋势。

关键词

重型运载, 舱段结构

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言




人类探索宇宙永无止境，月球是离地球最近的星球，载人“奔月”成为各国空间探索和空间活动的首要目标，重型运载火箭是进入深空不可或缺的运输工具，也是一个国家综合实力的重要体现[1]。重型运载火箭的研制能够提升火箭动力、结构设计、制造水平等，从而推动科学技术进步、带动基础能力提升、培养科技人才队伍，是一个国家政治、军事、应用、经济需求共同作用的产物[2]。美国从上世纪六十年代起就开始重型运载火箭的研制，前苏联也不甘落后，至今两国共有三种类型火箭成功发射，下面将分别介绍。

2. 已成功发射的重型运载火箭

1969年7月16日美国发射搭载“阿波罗11号”飞船的“土星”5号运载火箭，7月20日两名宇航员登上月球，为全人类“迈出一大步”。至今，人类成功发射的运载火箭有：美国的土星5号、俄罗斯的能源号和美国的航天飞机，各火箭的参数如表1所示[3][4]。

Table 1. The information sheet of successfully launched heavy launch vehicle

表 1. 成功发射的重型运载火箭信息表

火箭型号			
	土星 V (Saturn V)	能源号	航天飞机(Space Shuttle)
国家	美国	俄罗斯	美国
火箭直径/高度	10 m/110.6 m	7.75 m/58.7 m	8.7 m/47 m
芯级级数+助推器数	3 + 0	2 + 4	2 助推
助推器直径/高度	/	3.9 m/37.7 m	3.7 m/45.5 m
近地轨道运载能力	117 t	105 t	100 t
首飞时间	1967 年 11 月	1987 年 5 月 15 日	2005 年 7 月 26 日
成功飞行次数	13	2	118 (失败 2 次)
备注	/	第一次：“极地”号斯泰基-DM 型试验飞船 第二次：1988 年 11 月 15 日暴风雪号航天飞机	挑战者号、哥伦比亚号、发现号

2.1. “土星”5号运载火箭

“土星”5号火箭是美国实施“阿波罗”载人登月计划时使用的重型运载火箭，于1957年开始研制，先后制造了15枚，其中的13枚曾两次发射无人阿波罗飞船，十次发射载人阿波罗飞船，一次运送天空实验室；曾先后把33名宇航员送上太空，其中包括12名登上月球的宇航员。1967年11月成功实现首飞，共进行了13次发射，并全部成功。

“土星5”号(如图1所示)由一子级(S-IC级)、二子级(S-II级)、三子级(S-IVB级)、仪器舱和阿波罗飞船等组成。火箭第一级长42米，直径10米，尾段装有四个稳定尾翼，翼展约18米。第二级长25米，直径10米。第三级采用土星1B火箭的第二级，仪器舱也与其相同[5]。



Figure 1. The structure diagram of Saturn V launch vehicle [6]

图1. “土星”5号运载火箭结构图[6]

S-IC级结构如图2所示，主要组成部分为：前裙、氧化剂箱、箱间段、燃料箱和推力结构，结构的主要材料为铝合金。1) 前裙的后端与氧化剂箱连接，前端与S-II级连接。外蒙皮用7075-T6铝合金制成，并用隔框和桁条加强。2) 氧化剂箱的圆筒状箱壁由经机械铣成的“T”形剖面整体加筋加强，加筋上连接环形隔板，隔板可以增加箱的稳定性，同时可以抑制液氧晃动。箱底上安装的十字形板用来防晃和消旋。圆筒材料为2219-T87铝合金。蒙皮厚度不等，从后段到前段分八段逐渐变薄。3) 箱间段用来连接液氧箱和燃料箱，蒙皮壁板和环框全部用7075-T6铝合金制成。4) 燃料箱是圆筒状的，上、下有两个半椭圆球形的箱底，蒙皮用2219-T87铝合金制成，其厚度从后段到前段分四段逐渐变薄。5) 热防护板用于飞行时对发动机的关键元件和底部结构进行热防护，是一种蜂窝结构壁板，由15-7PH不锈钢箔制成的蜂窝芯板和厚0.254毫米的面板钎焊而成。6) 整流罩下部的构件主要由钛合金制成，上部用铝合金制成。7) 尾翼用来增加土星V火箭的气动稳定性，尾翼的蒙皮也是钛合金[7]。

箱间段(如图3所示)是非承压的圆柱形结构，段用来隔离燃料箱和氧箱，高约6.7米，直径10米，材料为7075-T6铝合金。由18个带褶皱的蒙皮壁板组成，蒙皮厚度由4~4.7毫米间渐变。五个I形梁沿航向分布，间距1.26米，用于保持箱间段壳体的圆度和结构稳定性。蒙皮上有开口和舱口盖用于人员操作维护、燃料及通风管路[8]。

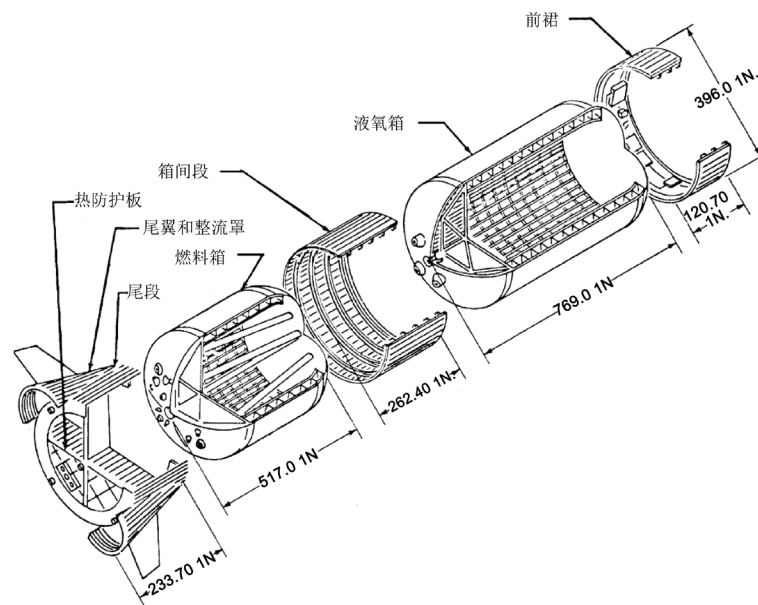


Figure 2. The schematic diagram of S-IC level of Saturn V launch vehicle
图 2. “土星”5号运载火箭 S-IC 级结构示意图

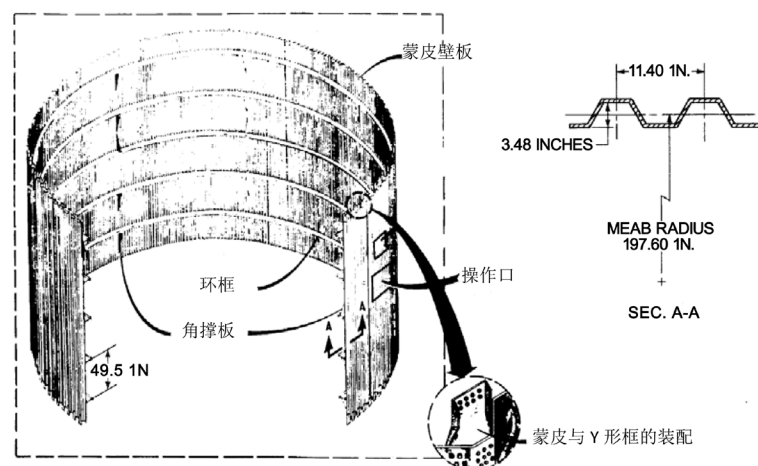


Figure 3. The schematic diagram of compartment of Saturn V launch vehicle
图 3. “土星”5号运载火箭箱间段结构示意图

2.2. “能源号”运载火箭

能源号是苏联研制的一种超重型运载火箭，由能源科研生存联合体设计[9]。能源号只执行过两次发射任务，而且第一次发射(1987年5月15日)中，有效载荷没有正常工作(极地号与能源号成功分离后调整姿态失败，重返大气层解体)。第二次发射(1988年11月15日)，能源号顺利将暴风雪号航天飞机送入预定轨道。伴随着苏联解体，能源号火箭停止生产[10]。

苏联对能源号火箭最关心的是重复使用问题，如果要把大有效载荷送入轨道的成本降下来，就必须解决这一问题。能源号火箭的结构如图4所示，其芯级有两级，芯一级使用的发动机是成熟的发动机，芯二级使用的发动机可重复使用，芯级上有四台捆绑助推器，助推器不能重复使用，但留有再入和着陆设备接口[11]。

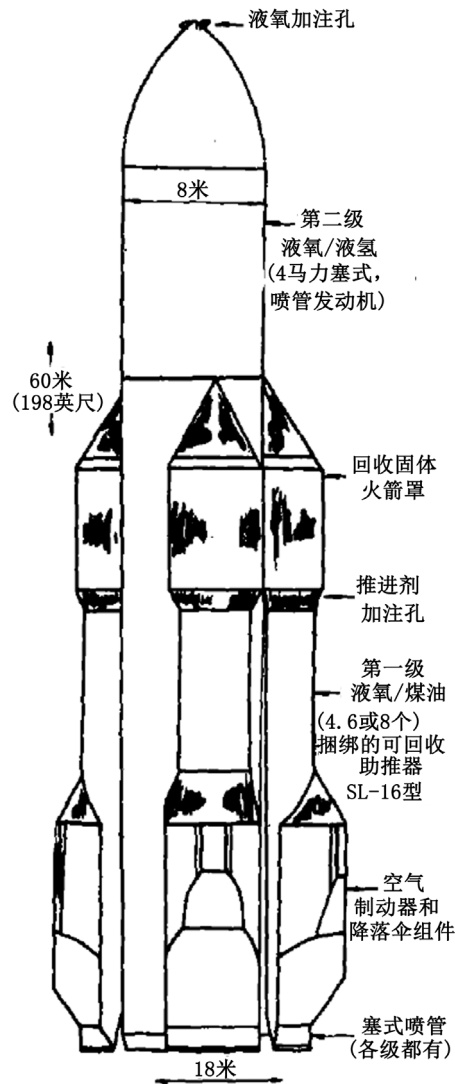


Figure 4. The structure diagram of Energia launch vehicle

图 4. “能源号” 运载火箭结构示意图

2.3. 航天飞机运载火箭

航天飞机是可重复使用的，往返于太空和地面之间的航天器，结合了飞机和航天器的性质，它既能代表运载火箭把人造卫星等航天器送入太空，也能像载人飞船那样在轨道上运行，还能像飞机那样在大气层中滑翔着陆[12]。美国是世界上第一个拥有与实际操作航天飞机的国家，自 1981 年首飞发射成功至今已完成了 100 多次空间飞行任务。1981 年 4 月 12 日，第一架实用航天飞机“哥伦比亚”号首次升空，开创了人类航天的一个新时代。2010 年初，NASA 正式决定将日渐老化的航天飞机全部退役，2011 年 7 月 21 日美国“亚特兰蒂斯”号航天飞机在佛罗里达州肯尼迪航天中心安全着陆，结束其“谢幕之旅”，这寓意者美国 30 年航天飞机时代宣告终结。

航天飞机的结构如图 5 所示，由轨道器、外贮箱和固体助推器组成[11]。美国的航天飞机外贮箱箱间段直径 8.38 米，由 8 块壁板组成：2 个整体式壁板、6 个桁条+蒙皮的壁板，5 个中间框：1 个主承力中框、4 个普通中框。桁条为几字形[13]。桁条、蒙皮、楔片和框环的装配如图 6 所示。

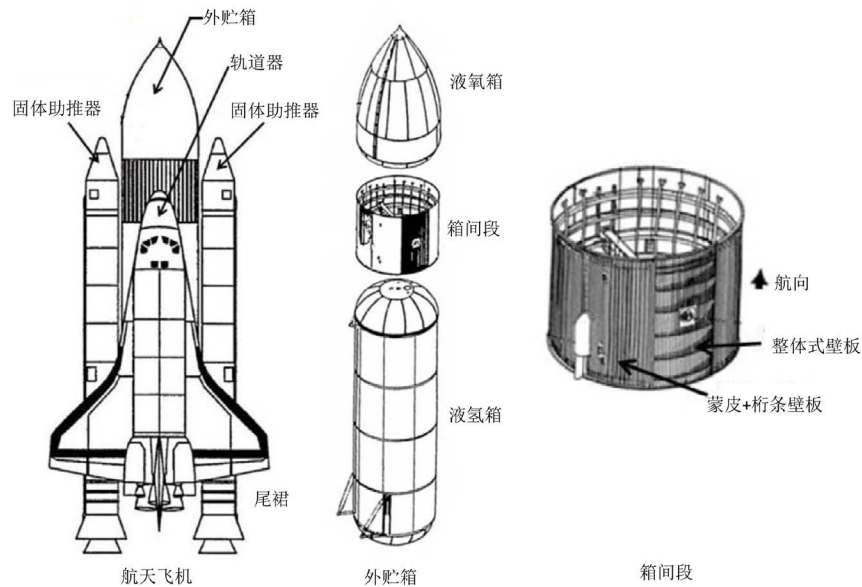


Figure 5. The schematic diagram of space shuttle [14]
图 5. 航天飞机结构简图[14]

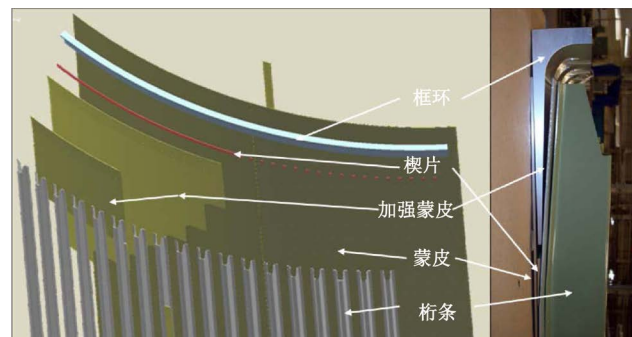


Figure 6. The schematic diagram of compartment of space shuttle [14]
图 6. 航天飞机箱间段结构图[14]

3. 研制的运载火箭

3.1. 战神五号运载火箭

战神五号(Ares V)运载火箭是美国国家航空航天局(NASA)设计的重型运载火箭，主要用于承载货物重返月球和未来的火星探测任务，结构如图 7 所示，火箭为两级捆绑两个助推，第一级(如图 8 所示)使用 6 台 RS-68 发动机，第二级使用 J-2X 发动机，助推器为 5.5 段可重复使用固体助推器。火箭总高 116.2 m，近地轨道运载能力 187.7 吨[14]。2009 年“星座”计划终止后，“战神”5 火箭的研制也随即终止，其成果和经验可用于美国新一代“空间发射系统”(SLS)的研制[3]。

3.2. 航天发射系统

航天发射系统(Space Launch System)是美国国家航空航天局(NASA)于 2011 年 9 月公布的一块重型运载火箭，用于国际空间站、地月试验、火星探测等[15]。航天发射系统火箭有 3 个基准构型，分别为：航天发射系统-1 型、-1B 型和-2 型，各构型的参数见表 2，结构简图见图 9。为实现载人深空探索目标，美国持续推进 SLS 重型火箭研制，计划 2020 年首飞。



Figure 7. The structure diagram of Ares V launch vehicle [15]
 图 7. 战神五号火箭结构图[15]

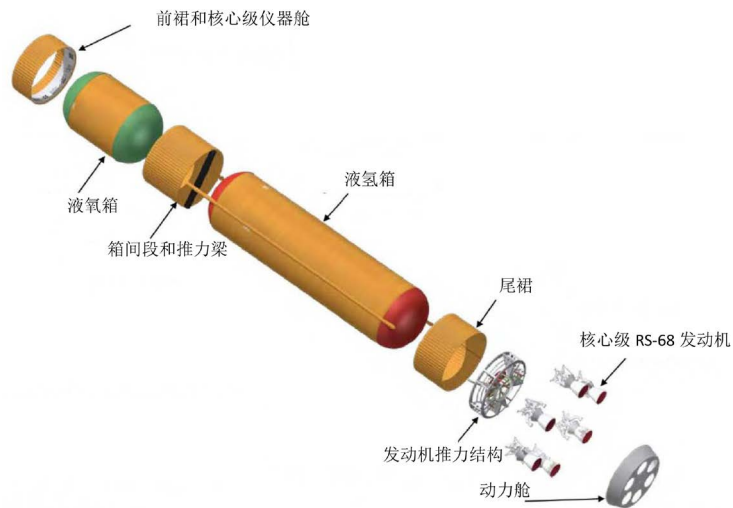


Figure 8. The schematic diagram of core stage of Ares V launch vehicle [15]
 图 8. 战神五号核心级火箭结构图[15]

Table 2. The configuration information table of space launch system [16] [17] [18]
 表 2. 航天发射系统构型信息表[16] [17] [18]

序号	构型	航天发射系统-1	航天发射系统-1B	航天发射系统-2
1	近地轨道运载能力	77 t	115 t	143 t
2	火箭直径/高度	8.4 m/98 m	8.4 m/111 m (载人) 8.4 m/100 m (载货)	8.4 m/111 m
3	芯级级数+助推器数	2 + 2	2.5 + 2	2.5 + 2
4	助推器直径/高度	3.7 m/54 m	3.7 m/54 m	/
5	芯一级	4 台 RS-25D/E 氢氧	4 台 RS-25D/E 氢氧	5 台 RS-25E 氢氧
	芯二级	1 台 RL-10B2 氢氧	1 台 RL-10B2 氢氧	1~3 台 J-2X
	助推	2 台 RSRM-V	2 台 RSRM-V	固体或液体
6	任务	绕月探测	载人及载货任务	火星取样 载人登火星

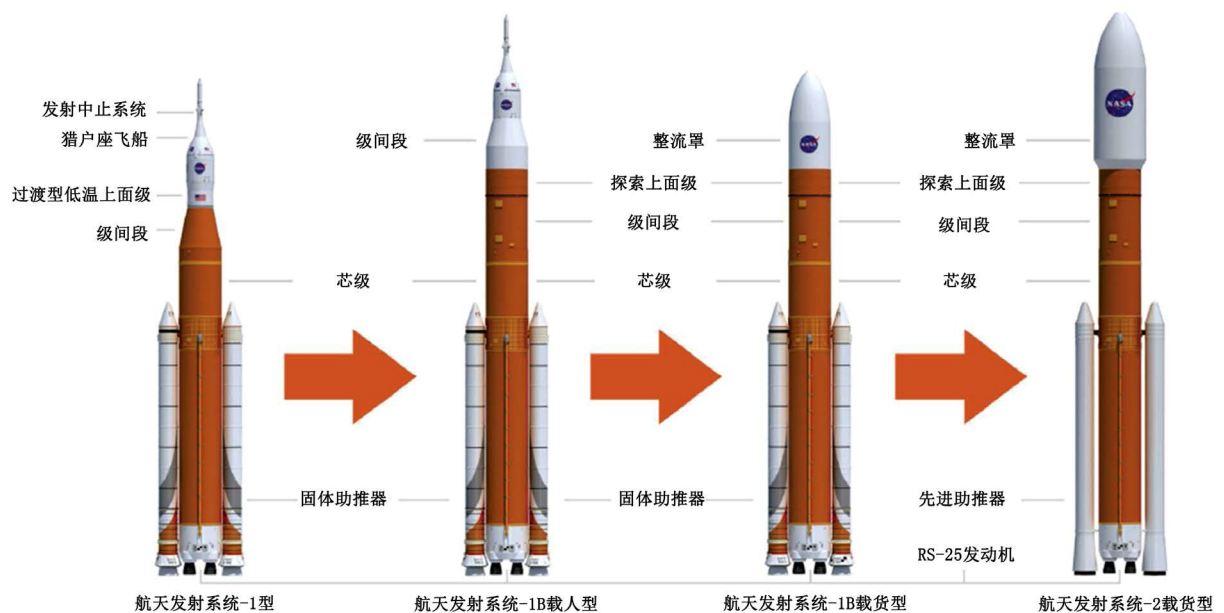


Figure 9. The structure diagram of space launch system

图 9. 航天发射系统简图

SLS 的芯级贮箱由 AMRO 公司负责，贮箱壁板是铣出来的网格结构，再用大功率压机滚弯至设计直径，最后各壁板通过焊接组成整箱。

4. 各国未来发展趋势

2018 年 9 月 24 日，美国国家航空航天局(NASA)发布《国家天空探索活动报告》，确定了美国国家太空探索活动从 2018 年到 2024 年之后在绕月轨道、月球表面、近地轨道及火星 4 个领域的路线图。美国将不晚于 2029 年登陆月球，并从 2019 年开始机器人往返火星及 2024 年决定人类登陆火星表面需要的技术投资组合和时间线。2019 年 4 月 2 日，美国航天局确认，计划在 2033 年将宇航员送上火星，并至少要在火星上生存两年。

SpaceX 公司将其用于月球探测和火星移民任务的星际运输系统更名为“超重-星舰”方案，并将其运载能力从最初设计的 150 t 降至 100 t；火箭级高度从 122 m 降至 63 m，直径由 12 m 缩减至 9 m。

据俄最新消息，俄已确定重型火箭的主选方案，但目前仍处于初步设计阶段。该方案由国家航天科研生产中心提出，芯级采用 RD-180 发动机，捆绑 6 枚助推器，采用 RD-171 发动机，实现 103t 的运载能力。

中国的重型运载火箭——长征九号运载火箭在 2012 年被首次提出，是为了满足我国未来登月、火星取样返回和外行星探测任务的需求，目前重型运载火箭已经完成深化论证。火箭直径近 10 米，近地轨道运载能力 100 吨，通过模块重组可以达到 125~130 吨。有望在 2030 年前后实现中国人安全地登上月球并返回地球的梦想。

5. 关于重型火箭舱段结构的思考

随着火箭运载能力的提高、直径的增大，对箭体结构材料的高强度低重量要求越来越高，舱段结构由原来的蒙皮桁架结构逐步向整体机加、铣切网格等方向发展。蒙皮、框、桁铆接结构(如图 10(a)所示)技术成熟、应用广泛，且零部件的加工难度相对较低，但传统的手工铆接存在位置精度差、噪声

大、劳动强度低等诸多缺点。网格加筋结构(如图 10(b)、图 10(c)所示)相比蒙皮框桁可提高结构的密封性能和抗疲劳性能,且大大减少连接件和零件数量,从而减少了装配劳动量,缩短装配周期和工作量。复合材料整体成型结构(如图 10(d)所示)复合材料整体成型结构可降低零件和装配成本,并可减轻结构重量。

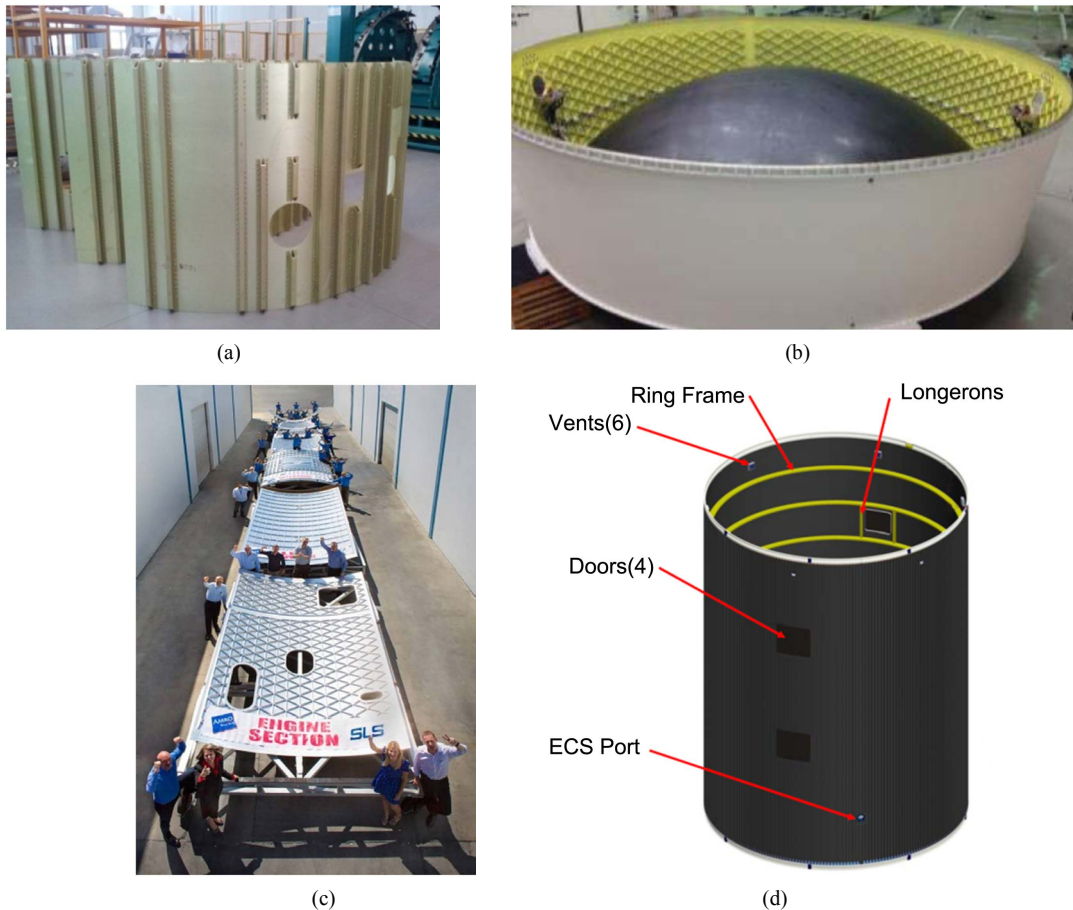


Figure 10. The structure diagram of space launch system. (a) Skin-frame-rivet joint structure [20]; (b) Overall mesh reinforcement structure [21]; (c) Mesh reinforced panel welding or riveting structure [18]; (d) Composite material integral forming structure [22]

图 10. 箭体结构铆接舱段的结构形式。(a)蒙皮、框、桁铆接结构[20]; (b)整体网格加筋结构[21]; (c)网格加筋壁板焊接或铆接结构[18]; (d)复合材料整体成型结构[22]

材料由单纯的铝合金向铝锂合金、铝镁合金、非金属材料等方向发展,如猎鹰 9 火箭箭体壳段承力结构采用碳纤维面板-铝蜂窝夹心材料,燃料贮箱采用均使用铝锂合金材料,这些材料比常规铝合金具有更高的强度和弹性模量、更低的密度,属高强轻量化材料[19]。新型结构、新型材料的研制必将对舱段的装配技术提出更高要求,从而促进基础制造能力的提升。

对我国重型运载火箭舱段研制个人有以下意见:①舱段研制可借鉴已经成功发射的国外运载火箭的结构,特别是承力方面的加强设计,并结合我国的长征三号系列、长征二号 F 运载火箭结构。②舱段材料可采用以铝合金为主、复合材料为辅的方式,如火箭中承力的尾段、过渡段等仍采用传统的铝合金材料,而箱间段、级间段等承力较小的部段可尝试采用非金属材料。③舱段结构直接影响装配方式,随着自动化钻铆进程的发展,舱段设计尽量采用便于自动钻铆的结构,如桁条型材最好统一、壁板分布最好

对称、内部结构尽量开敞。④舱段结构设计考虑重复使用，重型运载火箭的研制成本必将高于现有运载火箭，某些舱段回收后经检查、维修后再次使用，可大大减少制造成本。

6. 结束语

已成功发射的重型运载火箭舱段结构以传统的铝合金、蒙皮框桁结构为主，以承力梁、框来提高结构的强度，装配方式为铆接装配。研制中的火箭逐步采用复合材料、整体机加、铣切网格等结构，对机械加工能力要求较高，装配也逐渐摆脱传统的手工铆接，逐步向焊接、自动钻铆方向发展。随着重型运载火箭对高强度、低密度材料的要求越来越高，铝锂合金、铝镁合金、非金属材料等基础材料也逐步发展起来。

载人登月、火星探测，不仅是对一个国家综合国力的考验，更是对本国基础制造能力的考察。美国的“土星”5号运载火箭1967年首飞成功，前苏联的能源号运载火箭1987年首飞成功，中国的长征九号重型运载火箭预计2030年首飞，新型重型运载火箭舱段的研制可参考已飞行的火箭结构，并结合新材料新工艺的发展大胆创新，提高我国的基础制造能力。

参考文献

- [1] 龙乐豪, 容易. 现代“嫦娥奔月”的技术途径设想[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(1): 1-7.
- [2] 张智, 容易, 秦瞳, 孙冀伟. 重型运载火箭总体技术研究[J]. 载人航天, 2017, 23(1): 1-7.
- [3] 刘竹生, 张菽, 张涛, 李烁. 国外重型运载火箭研制启示[J]. 中国航天, 2015(1): 22-27.
- [4] 龙乐豪. 我国载人登月技术途径探讨[J]. 前沿科学, 2008, 2(4): 29-38.
- [5] 田勇. 通天神箭 火箭[M]. 北京: 吉林人民出版社, 2014: 100-102.
- [6] NASA (1967) NASA Saturn V Manned Flight to the Moon. An Educational Publication of the National Aeronautics and Space Administration.
- [7] 裴鸣远, 张振华, 文隆枝. 土星 V 飞行手册 SA507-第四章 S-IC 级[J]. 国外导弹技术, 1979(z1): 63-64.
- [8] Levine, S.H. (1979) Description of the S-IC Stage Structure.
- [9] 孙广勃. 各国运载火箭介绍: 能源号(俄罗斯)[J]. 中国航天, 1996(1): 20.
- [10] 谢亮. 苏联能源号超级运载火箭[J]. 世界导弹与航天, 1988(1): 6-8.
- [11] 薛亮. 苏联能源号火箭的详细情况[J]. 世界导弹与航天, 1989(3): 25.
- [12] 王向阳. 美国的航天飞机[J]. 国外导弹技术, 1985(7): 46-49.
- [13] Phillips, D.R., Saxon, J.B. and Wingate, R.J. (2012) Test-Analysis Correlation of the Single Stringer Bending Tests for the Space Shuttle ET-137 Intertank Stringer Crack Investigation. *53rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, HI, 23-26 April 2012, 1-53. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1782>
- [14] Oliver, S.T. (2012) STS-133/ET-137 Tanking Test Photogrammetry Assessment. *The 53rd AIAA SDM Conference*, Honolulu, HI, 23-26 April 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1780>
- [15] Phil, S. (2009) Ares I Ares V Overview.
- [16] 解晓芳, 才满瑞. 美国航天发射系统重型火箭研制进展[J]. 国际太空, 2016(12): 36-41.
- [17] 佟艳春, 才满瑞. 美国新一代重型运载火箭发展分析[J]. 国际太空, 2012(5): 45-52.
- [18] 丁新玲, 郭博闻. 美国重型“太空发射系统”结构及制造技术[J]. 航天制造技术, 2017(2): 1-7.
- [19] 吴晗玲, 宋保永, 苏晗, 张乔飞. 猎鹰9运载火箭结构分系统设计特点分析与研究[J]. 飞航导弹, 2017(9): 1-4, 59.
- [20] 章茂云, 孙立强, 金健, 臧建新, 孟令博, 庄树鹏. 运载火箭一级箱间段壁板自动钻铆工艺研究[J]. 制造技术研究, 2014(2): 22-25.
- [21] NASA (2014) NASA Space Launch System Operations Outlook.
- [22] Sleight, D., Sreekantamurthy, T., Kosareo, D., Martin, R. and Johnson, T. (2011) Structural Design of Ares V Intertank Composite Structure. *52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Denver, CO, 4-7 April 2011. <https://doi.org/10.2514/6.2011-1790>